

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 8 日現在

機関番号：12614

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2012～2016

課題番号：24110005

研究課題名(和文)海洋生態系における放射性物質の移行・濃縮状況の把握

研究課題名(英文)Transfer and accumulation of radioactive material in marine ecosystem

研究代表者

神田 穰太(Kanda, Jota)

東京海洋大学・学術研究院・教授

研究者番号：60202032

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 84,100,000円

研究成果の概要(和文)：海洋生態系における福島第一原子力発電所事故由来の放射性物質について、以下の研究を行った。1)福島沿岸域において生物と環境の放射性セシウムについて、年に2回の船舶観測による経時的なデータセットを得た。また外洋域の動物プランクトンについても複数の海域で時系列データを得た。2)岩礁性の底生魚に重点を置いて、生態系への移行経路を検討した結果、懸濁・沈降粒子や堆積物の有機物画分等からの移行は小さいことを確認した。3)現場観測データを用い、生態系内の放射性セシウム推移をモデルにより再現し、海洋生物の放射能レベルの今後の推移について検討した。

研究成果の概要(英文)：Radioactive material derived from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident was investigated in marine ecosystem. 1) For radioactive cesium in marine organisms and environment in the coastal area of Fukushima, we obtained a continuous time-series data set by ship observations twice a year. Time-series data set for radioactive cesium in zooplankton was also obtained in several open ocean areas. 2) Examinations of transfer routes of radioactive cesium in coastal rocky seafloor revealed that transition of radioactive cesium from suspended or descending particles, and from organic fraction of sediments was small. 3) Using the on-site observation data, the transition of radioactive cesium in the ecosystem was reproduced by a numerical model, and the model was applied to prediction of the future trend of the radioactivity level of marine organisms.

研究分野：海洋生物地球化学

キーワード：環境放射能 沿岸海域 外洋域 海洋生態系

1. 研究開始当初の背景

福島第一原子力発電所事故により放出された放射性核種により、海洋にも大きな影響がおよんだ。特に食用魚介類からの放射性核種の検出は、水産業に深刻な打撃を与えている。今回の事故による海洋汚染は、過去の事例と大きく異なる特徴を有する (Yoshida and Kanda, 2012)。大気経由の沈着と共に、汚染水の直接流出によって、大量の放射性核種が、極めて短期間 (2~3 週間程度) に太平洋岸の開放的な海域にもたらされた。このため、海洋環境の放射能は時間的のみならず空間的にも非常に大きく変動した。沿岸域では、汚染水流出によって極めて高いレベルまで上昇した海水の放射能が急速に希釈され、堆積物を中心に不均一に残存している状況にある。魚介類については、海水の放射能レベル低下に速やかに追従したカタクチイワシ稚魚のような例だけではなく、底魚類を中心に、減少が緩慢な種類も見られている。また、同一種でも個体間の放射能レベルの偏差が極めて大きい。

海洋汚染についての以上の特異性を踏まえれば、今回の事故での食物連鎖を通じた放射性核種の生物学的移行・濃縮について、大気圏内核実験、チェルノブイリ事故、アイリッシュ海汚染などの事例を通して得られた知見を単純に当てはめることは困難である。こうした状況を踏まえ、海水・堆積物における放射性核種の分散・移送や、海洋生態系内の移行・濃縮について十分な研究データを経時的に蓄積する必要がある。また、漁業再開を見通す上からは、海洋生物とりわけ食用魚介類の放射能レベルの今後の推移を高い確度で予測することが強く求められている。

2. 研究の目的

福島県沿岸海域生態系および西部北太平洋沖合海域の表・中層生態系を対象とし、以下の目的で研究を行った。

(1) 海洋生態系を構成する各生物群、海水、堆積物、浮遊・沈降粒子等について、研究実施期間を通じた調査によって時系列的な変動を明らかにする。

(2) 得られた時系列データおよび海域による差異の検討、食物網構造の解析を並行して行い、放射性核種の生態系での移行について、その経路やメカニズムを明らかにする。

(3) 以上の時系列データとメカニズム解析から、生態系内での放射性核種の移行について、生態系モデルによるシミュレーションを実施する。

(4) 観測データとモデルによるシミュレーションを総合して、海洋生物の放射能レベルの今後の低下過程について、確度の高い予測を行う。

なお、海洋生物で検出された主要な放射性核種には ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ があるが、相

対的に放出量が大きくかつ物理的半減期の長い ^{134}Cs および ^{137}Cs を主な対象とした。

3. 研究の方法

(1) 海洋生態系における放射性物質の時系列データの取得

福島県沖の沿岸海域において、堆積物、底生生物、海水、浮遊生物・小型遊泳生物を対象に、東京海洋大学練習船「海鷹丸」、同「神鷹丸」、北海道大学水産学部練習船「おしよる丸」によって年 2 回の試料採取を行った。また、海洋研究開発機構「新青丸」等でも、一部の調査を実施した。また、海洋研究開発機構研究船「みらい」等により西部北太平洋において表・中層の浮遊生物、小型遊泳生物、海水を対象として試料採取を行った。浮遊生物・小型遊泳生物は、プランクトンネット等により採取し、底生生物は主にドレッジにより採取した。いずれも採取量に応じて、生物種ないし分類群別に分別し、凍結して研究室に持ち帰った。試料は湿重量計測後、真空定温乾燥装置で乾燥し、必要な場合は灰化処理を行う。処理済み試料は現有および γ 線スペクトロメーターにより、 ^{137}Cs および ^{134}Cs (検出可能であれば) $^{110\text{m}}\text{Ag}$ の測定を行った。

(2) 放射性核種の移行経路・メカニズムの解析

海洋生態系における放射性核種の移行経路および移行メカニズムについて、胃内容物解析とおよび ^{15}N 、 ^{13}C 安定同位体解析等によって食物網構造の解析を行うと共に、セシウム放射能低下が遅れている岩礁性の底魚などの生息域に焦点を絞り、 ^{137}Cs 移行の詳細な観測を実施した。また生態系への継続的な供給に関連して、発電所からの継続流出について、港湾内の放射能収支から評価したほか、陸域からの ^{137}Cs 継続流出について、複数の計画研究班および公募研究者と協力して現場観測およびモデル解析を実施した。

(3) 生態系内放射性核種の移行モデルの構築および将来予測

時系列データの蓄積、移行経路・メカニズム解析に関する現場観測の進展を踏まえ、平成 26 年度から新たに電力中央研究所の立田稜を研究分担者に加え、モデルによるシミュレーションを実施し、現場観測データの再現とパラメータ設定の検討を行った。モデルと実測データを総合し、魚介類を含む海洋生物および放射能レベルの今後の推移について検討した。

4. 研究成果

(1) 海洋生態系における放射性物質の時系列データの取得

大学練習船による福島沖沿岸域生態系の放射能汚染に関する調査は、本計画研究開始前を含めて 2011 年 7 月以降、およそ半年に 1 回実施し、2016 年 10 月までに計 13 回実施し

た。海水、海底堆積物、プランクトン、ベントス、沈降粒子の採集を行い、各試料中の ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能の時空間変動を明らかにした。

プランクトンネット試料の ^{137}Cs 放射能

東京海洋大学の研究グループの観測結果では、沿岸域でも海岸に近い浅海域では、プランクトンネットサンプルの放射能は、時間の経過とともに必ずしも低下せず、航海毎に増減した(図1)。特に荒天後の航海で高い傾向があった。沖合側では、2011年7月の海鷹丸による調査でも数Bq/kg-wetと低く、海水の放射能低下に応じて比較的速やかに低下したことを示している。

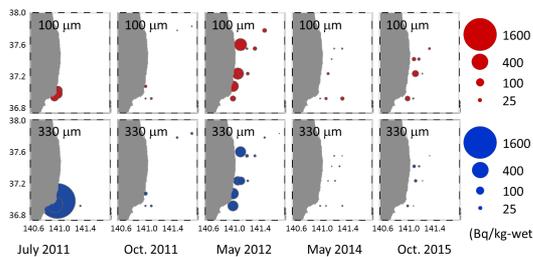


図1. 福島県沿岸海域におけるプランクトンネット試料の ^{137}Cs 放射能分布の推移

プランクトンネット試料の顕微鏡観察からは、動物プランクトンの他に、多数の鉱物粒子や有機粒子が混在していることが判明し、荒天後に放射能濃度が高くなる原因としては、陸域からの非生物粒子の流入や海底に沈降した粒子の再懸濁の可能性が考えられた。 ^{137}Cs 放射能の高いプランクトンネット試料についてイメージングプレートを用いたオートラジオグラフィを行ったところ、高線量の粒子がしばしば見いだされた。2011年7月に塩屋崎付近で得た試料に関しては、約2mm角の繊維強化プラスチックにセシウムの他に鉄やケイ素を多く含む数μmの粒子が存在するのが確認できた。このように浅海域のプランクトンネット試料にみられる高い放射能は、高線量粒子の混在が寄与していることが示唆された。

沖合側のプランクトンネット試料は概ね動物プランクトンが主であった。前述の通り、事故当初の放射能低下は速やかであったものの、その後の海水中の ^{137}Cs 放射能の推移と比較すると低下が緩慢で、見かけの濃縮係数(湿重量あたり動物プランクトン放射能の海水の重量あたり放射能に対する比)が上昇する傾向が見られた。研究分担者の西川淳の解析によると、福島第一原子力発電所から45kmの観測点では、海水および動物プランクトンは共に放射能が低下しているが、見かけの濃縮係数については、事故後の2011年6月に44であったが、2012年10月には5240まで上昇し、2013年5月でも882となっていた。沖合域の海水放射能、動物プランクトン群集組成・放射能については、北海道大学の

研究グループも観測を行った。

外洋域の動物プランクトンについて、研究分担者の喜多村稔が計15測点より計47個の動物プランクトン試料を採集し、セシウム放射能の測定を行った。最も遠い観測点は福島第一原発から2200km離れていたが、全ての動物プランクトン試料より福島原発事故由来である ^{134}Cs を検出した。動物プランクトン中のセシウム放射能は25°N付近の2測点において最も高く、その理由は海水中のセシウム濃度の水平分布パターンや動物プランクトン群集組成からは説明出来ず、高線量粒子の混入も確認できなかった。さらに時系列観測として、亜寒帯測点K2(47°N, 160°E)および亜熱帯海域(測点S1: 30°N, 145°Eと測点77: 30°N, 149°50'E)において、事故1ヶ月後(2011年4月)より事故3年4ヶ月後(2014年7月)にかけて、計6航海の観測結果を行った。この時系列観測においても、前述の西川らの解析と同じく、動物プランクトン中のセシウム放射能の経時変化は、海水よりも遅い傾向が見られた。

ベントス(底生生物)の ^{137}Cs 放射能

東京海洋大学の研究グループが福島沖の各観測点でドレッジまたはそりネットで採集したベントスの ^{137}Cs 放射能(Bq/kg-wet)を、図2に示す。

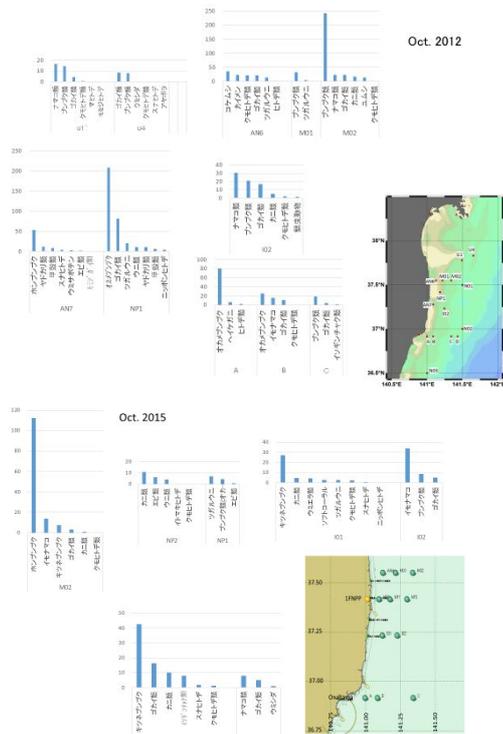


図2. 福島県沿岸海域における底生生物の ^{137}Cs 放射能データの例(2012年10月と2015年10月)

ベントスの ^{137}Cs 放射能は、海底堆積物の放射能低下とほぼ対応して、全測点で経時的に低下したが、第一原発に近い観測点で特に値が高い傾向は見られなかった。むしろ小名浜沖の観測点では低下が遅い傾向が見られ

た。第一原発南側では岸近くの海水や海底堆積物から高い¹³⁷Cs放射能が観測されており、事故当初に高濃度汚染水が岸沿いを南下したことや、汚染した堆積物が南へ移動したことを反映していると考えられている。またブク類やナマコ類のような泥質の堆積物を好む種で、やや高い値が観測された。これらの生物種では消化管内に泥質の堆積物を含むことが多く、粒度の小さな泥質の堆積物ほど¹³⁷Cs放射能が高い傾向があることが原因と考えられた。

(2) 移行経路・メカニズムの解析

福島県による魚介類モニタリングの結果によれば、事故後に1,000 Bq/kg-wet以上の高い放射性セシウム(¹³⁷Cs + ¹³⁴Cs)が検出された魚種でも、その後の低下過程は種によって異なり、底生魚を中心に低下が際立って遅い種が存在している。

既往の知見では海産魚類の放射性セシウムの生物学的半減期は数週間から100日程度である。海水中のセシウム濃度は事故後急速に低下したことから、何らかの継続的な移行過程が存在することが考えられ、福島第一原子力発電所港湾から沿岸域への¹³⁷Csの継続流出が一つの可能性として指摘されていた(Buesseler, 2012)。研究代表者の神田は、発電所からの継続流出の影響について、港湾の海水交換率の推定にもとづく定量的評価を行い、生態系への影響は限定された海域でのみ有意であることを示した。

海水中のセシウム放射能は十分に低下したことから、一部の魚種での放射性セシウムの低下の遅れは、餌経路によるものである可能性が考えられ、本研究における放射性核種の移行経路・メカニズムの解析は、この点に重点をおいて実施した。

まず、堆積物中の放射性セシウムがベントスを経由して底生魚に移行する可能性があることから、本研究で得られた堆積物試料の一部について、有機物分画の放射能の定量を行った。有機物分画の質量あたり放射能は鉱物性成分よりも高い結果が得られたものの、底生魚の放射能低下の遅れを説明するには不十分なレベルであった。ベントスの放射能観測の結果とあわせ、底生魚の放射能レベルの低下の遅れを堆積物の放射能残留のみで説明するのは困難と考えられた。

一方、2014年の時点で、アイナメやヒラメなどの底生魚に比べて、岩礁性魚類であるシロメバルでは特に放射能濃度の低下が遅いことが解って来た。シロメバルはある程度成長すると同じ岩礁の周辺に留まると言われており、特定の岩礁における汚染の継続が放射セシウムの低下を阻害している可能性がある。そこで、第一原発から約5 km南の熊川沖の岩礁地帯において、漁船による観測を追加実施することとし、2014年以降継続的に観測を実施した。

岸寄りの水深30m以浅で、懸濁粒子や、岩

礁性魚であるシロメバルとその餌生物であるアミ類の採集を行った。

2014年1月～2015年6月の間に14回、熊川沖水深20mの地点において、海底上約1mの海水を現場ろ過器により大量ろ過し懸濁粒子を捕集し、¹³⁷Cs放射能の測定を行った。懸濁粒子の¹³⁷Cs放射能は1000～2300 Bq/kg-dryの間で大きく変化し、有意な傾向を示さなかった。セディメントトラップによって捕集された沈降粒子も同様の高い値を示した。これらの値は同地点における表層堆積物の値よりはるかに高かった。この粒子中の放射性セシウムが餌経路で移行すれば、シロメバルの放射能低下の遅れは説明可能と考えられたが、アミなどの餌生物の¹³⁷Cs放射能は概ね数Bq/kg-wetで、放射能の移行経路を見いだすことはできなかった。

この調査で採集されたシロメバルの¹³⁷Cs放射能は、若齢魚で低く年齢とともに上昇するが、8才を越えたものではほぼ一定となった。2006年以前の年級群では、2014年11、12月に採集した個体では161±25 Bq/kg-wet(n=14)であったが、翌年の同時期に採取した個体では70±13 Bq/kg-wet(n=8)となり、生態学的半減期は約300日と見積もられた。原発事故後に生まれた個体では数Bq/kg-wet程度の低レベルのものが多く、このことから餌経路での¹³⁷Cs移行の寄与は小さいと考えられた。

高齢魚における高い¹³⁷Cs放射能は、高濃度汚染水からの直接取込が大きく影響していると考えられる。その後の濃度低下の遅れについては、メバルの高齢魚で指摘された、排出速度が遅い可能性、すなわち生物学的半減期が既往知見よりもはるかに長い可能性(Matsumoto et al., 2015)以外では説明し難いと考えられる。この点は(3)のモデルを適用した結果からも支持された。

一方、調査で得られた¹³⁷Cs放射能が1000～2300 Bq/kg-dryの懸濁粒子についてイメージングプレートによる解析を行った結果、懸濁粒子中に高い放射線量を示す粒子が普遍的に存在した。全体の放射能に対する高線量粒子の放射能の寄与は、10～90%に及ぶと推定された。大気や陸域で見いだされた高線量粒子は容易には水に溶けないものが知られており、また可溶性の高線量粒子が海水中で残存しているとは考えにくい。不溶性の高線量粒子については¹³⁷Csの生物体内への移行には関与しない可能性が高いと考えている。

(3) 生態系内移行モデルの構築

研究分担者の立田穰を中心に、生態系内の¹³⁷Cs放射能移行についてのコンパートメントモデルを構築し、本計画研究で得られた海水・プランクトン・ベントスの観測結果を適用して、モデルの妥当性を検討した。

まず福島県30km圏内のヒラメにおける濃度の時系列変化についてコンパートメントモデルによるシミュレーションから胃内容

部物の ^{137}Cs 放射能を再構築し、実測データと比較検討した。ヒラメ中放射性セシウム濃度の低減は、代謝排泄と餌生物中濃度の低下で説明できた。また、福島県南岸のベントスにおける ^{137}Cs 放射能の時系列変化について、同様にコンパートメントモデルによるシミュレーションを適用した。ベントスの ^{137}Cs 放射能実測値は、南岸の海水 ^{137}Cs 放射能を用いたシミュレーションによる再構築値より高く、ベントスが摂取する海底有機物による濃度上昇の寄与が示唆された(図3)。特にベントスを摂取する際に海底堆積物を連行摂取するババガレイなどでは、海底堆積物からの移行の可能性を仮説として提案した。

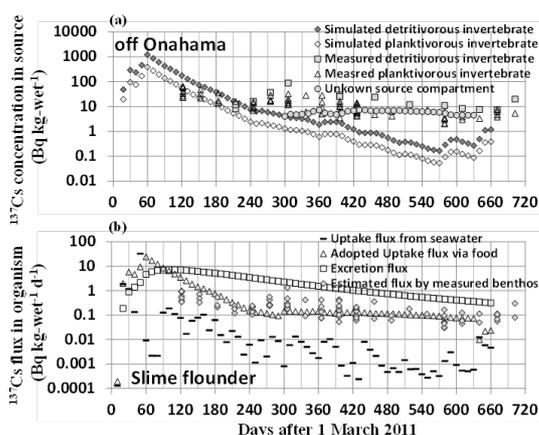


図3. ベントスにおける理論的経時濃度再構築レベルと実測値(上), および底生魚への移行フラックス(下)

さらに福島第一原子力発電所の港湾のヒラメにおける ^{137}Cs 放射能の時系列変化, コウナゴやシラスなどのプランクトン食性稚魚類における ^{137}Cs 放射能, などが本モデルで再現可能なことを示し, (2) に示したシロメバルについての観測データ等にシミュレーションを適用した解析を取りまとめている。また, これらのモデルによる将来予測を検討中である。

<引用文献>

Yoshida, N., J. Kanda (2012) Tracking the Fukushima Radionuclides. *Science*, 336, 1115-1116,

Buesseler, K.O. (2012) Fishing for Answers off Fukushima. *Science*, 338, 480-482.

Matsumoto, A., Y. Shigeoka, H. Arakawa, N. Hirakawa, Y. Morioka, T. Mizuno (2015) Biological half-life of radioactive cesium in Japanese rockfish *Sebastes cheni* contaminated by the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *J. Environ. Radioact.*, 150, 68-74.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計60件)

Tateda, Y., D. Tsumune, K. Msumi, T. Aono, J. Kanda (2017) Biokinetics of radiocesium depuration in marine fish inhabiting the vicinity of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. *J. Environ. Radioact.* 166, 67-73. doi: 10.1016/j.jenvrad.2016.02.028. (査読有)

Kitamura, M., M.C. Honda, Y. Hamajima, Y. Kumamoto, M. Aoyama, H. Kawakami, T. Aono, M. Fukuda, Y. Mino (2017) Temporal changes in radiocesium contamination derived from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident in oceanic zooplankton in the western North Pacific. *J. Environ. Radioact.* 172, 163-172. doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.03.024 (査読有)

石丸 隆・伊藤友加里・神田穰太 (2017) 放射性物質と海洋生態系. 沿岸海洋研究, 54, 143-149. (査読有)

Baumann, Z., N. S. Fisher, C.J. Gobler, K.O. Buesseler, J.A. George, C.F. Breier, J. Nishikawa (2015) Fukushima ^{137}Cs at the base of planktonic food webs off Japan, *Deep-Sea Research Part 1*, 106, 9-16, Doi:10.1016/j.dsr.2015.09.006 (査読有)

今井圭理・渡辺 豊 (2015) 「おしよる丸」を利用した北太平洋表層における東京電力福島第一原子力発電所事故後の放射性セシウム濃度の継続的調査. 北海道大学水産科学研究彙報, 65, 111-116. (査読有)

Kanda, J. (2013) Continuing ^{137}Cs release to the sea from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant through 2012, *Biogeosciences*, 10, 6107-6113, Doi:10.5194/bg-10-6107-2013 (査読有)

[学会発表](計56件)

神田穰太・石丸隆・土屋光太郎・伊藤友加里・喜多村稔・西川淳・青野辰雄・山口篤・渡辺豊・今井圭理・立田穰・小林卓也・芳村毅(2017) 海洋生態系における放射性核種の動態, 第18回環境放射能研究会, 2013年3月15日, 高エネルギー加速器研究機構

石丸隆・伊藤友加里・大槻まゆみ・神田穰太・小川展弘・津田敦(2017)福島沖で採取

したプランクトン資料の放射能濃度と高セシウム線量粒子, 日本海洋学会 2016 年度秋季大会, 鹿児島大学

青野辰雄・石丸隆・神田穰太・伊藤友加里・早乙女忠弘・水野拓治・五十嵐敏・吉田聡 (2013) 福島沿岸における海洋生物中の放射性核種濃度について, 第 14 回環境放射能研究会, 2013 年 2 月 26 日, 高エネルギー加速器研究機構

[図書](計 2 件)

神田穰太・青野辰雄・石丸隆 (2014) 『原発事故環境汚染 福島第一原発事故の地球科学的側面』, 5.5~5.8 節 (p.111~126), 中島映至, 大原利真, 植松光男, 恩田裕一編, ISBN978-4-13-060312-6, 東京大学出版会, 312 頁

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神田 穰太 (KANDA, Jota)
東京海洋大学・学術研究院・教授
研究者番号: 6 0 2 0 2 0 3 2

(2) 研究分担者

喜多村 稔 (KITAMURA, Minoru)
海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・技術研究員
研究者番号: 0 0 3 9 2 9 5 2

西川 淳 (NISHIKAWA, Jun)
東海大学・海洋学部・教授
研究者番号: 1 0 2 8 2 7 3 2

青野 辰雄 (KITAMURA, Minoru)
量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所福島再生支援本部・チームリーダー
研究者番号: 2 0 2 7 0 6 0 5

田中 祐志 (TANAKA, Yuji)
東京海洋大学・学術研究院・教授
研究者番号: 9 0 2 0 7 1 5 0

野田 明 (NODA, Akira)
東京海洋大学・学術研究院・教授
研究者番号: 8 0 2 6 2 3 4 3

林 敏史 (TANAKA, Yuji)
東京海洋大学・学術研究院・教授
研究者番号: 7 0 2 2 8 5 8 4

茂木 正人 (MOTEKI, Masato)
東京海洋大学・学術研究院・准教授
研究者番号: 5 0 3 3 0 6 8 4

土屋 光太郎 (TSUCHIYA, Kotaro)
東京海洋大学・学術研究院・准教授
研究者番号: 6 0 2 5 1 6 8 3

渡辺 豊 (WATANABE, Yutaka)
北海道大学・地球環境科学研究科(研究院)・准教授
研究者番号: 9 0 3 3 3 6 4 0

山口 篤 (YAMAGUCHI, Atsushi)
北海道大学・水産科学研究科(研究院)・准教授
研究者番号: 5 0 3 4 4 4 9 5

高木 省吾 (TAKAGI, Shogo)
北海道大学・水産学部・准教授
研究者番号: 6 0 1 7 9 4 2 1

今井 圭理 (IMAI, Keiri)
北海道大学・水産学部・助教
研究者番号: 4 0 7 2 5 9 8 3

立田 穰 (TATEDA, Yutaka)
電力中央研究所・環境科学研究所・上席研究員
研究者番号: 6 0 3 7 1 5 2 2

(3) 連携研究者

守屋 繁春 (MORIYA, Shigeharu)
理化学研究所・基幹研究所・専任研究員
研究者番号: 0 0 3 2 1 8 2 8

小林 卓也 (KOBAYASHI, Takuya)
電力中央研究所・環境科学研究所・上席研究員
研究者番号: 6 0 3 7 1 5 3 0

芳村 毅 (YOSHIMURA, Takeshi)
電力中央研究所・環境科学研究所・主任研究員
研究者番号: 2 0 3 7 1 5 3 6

(4) 研究協力者

石丸 隆 (ISHIMARU, Takashi)
五十嵐 敏 (IGARASHI, Satoshi)
須賀 次郎 (SUGA, Jiro)
山川 紘 (YAMAKAWA, Hiroshi)
大津 秀暁 (OTSU, Hideaki)
伊藤 友加里 (ITO, Yukari)
高澤 伸江 (TAKAZAWA, Nobue)
内山 香織 (UCHIYAMA, Kaori)
久保 篤史 (KUBO, Atsushi)